U N I V E R S I T E P A R I S - S U D
FACULTE DE MEDECINE KREMLIN-BICETRE

No 63

Année 1975 N°

THESE
pour le

DOCTORAT EN MEDECINE
(Diplôme d'Université)

présentée et soutenue publiquement le 1975

par

LAM THI QUYNH HOA
née le 21 novembre 1942 à Gia-Dinh (Viêtnam)

LA POLLUTION DE L'ATMOSPHERE DES VILLES PAR LES GAZ D'ECHAPPEMENT DES VEHICULES A MOTEUR

U N I V E R S I T E P A R I S - S U D
FACULTE DE MEDECINE KREMLIN-BICETRE

Année 1975 N°

THESE
pour le

DOCTORAT EN MEDECINE
(Diplôme d'Université)

présentée et soutenue publiquement le 1975

par

LAM THI QUYNH HOA
née le 21 novembre 1942 à Gia-Dinh (Viêtnam)

LA POLLUTION DE L'ATMOSPHERE DES VILLES PAR LES GAZ D'ECHAPPEMENT DES VEHICULES A MOTEUR

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

A notre maître et président de thèse

MONSIEUR LE PROFESSEUR H. SAPIN-JALOUSTRE

qui nous a fait l'honneur d'accepter
la présidence de cette thèse

HOMMAGE DE NOTRE GRAND RESPECT
ET DE NOTRE PROFONDE GRATITUDE

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548111_0021

LA POLLUTION DE L'ATMOSPHERE DES VILLES PAR LES GAZ D'ECHAPPEMENT DES VEHICULES A MOTEUR

PLAN

INTRODUCTION

I.- SOURCES, NATURE ET COMPOSITION DES POLLUANTS

- A.- L'ampleur du parc des automobiles
- B.- Les types de moteur et les polluants
  - 1) Moteurs à essence et leurs polluants
  - 2) Moteurs diésel et leurs polluants
  - 3) Autres polluants

II.- VOLUMES DES EMISSIONS

III.- FACTEURS METEOROLOGIQUES

- A.- Conditions favorisant la dispersion des polluants
- B.- Conditions favorisant l'accumulation des polluants
- C.- Conditions favorisant la transformation des polluants

IV.- CONCENTRATIONS MOYENNES OBSERVEES

- A.- Les Oxydes de Carbone
- B.- Les Oxydants
  - 1) L'ozone
  - 2) Les PAN
- C.- Les Aldéhydes
- D.- Les Oxydes d'azote
- E.- Les Hydrocarbures
- F.- Le Plomb et ses dérivés

V.- SURVEILLANCE DES NIVEAUX DE POLLUTION

- A.- Les principaux objectifs
- B.- Méthodes d'études
  - 1) L'étude des conditions météorologiques
  - 2) Le programme des mesures proprement dites
  - 3) La réduction de la visibilité
  - 4) Indicateurs végétaux de la pollution atmosphérique

VI.- EFFETS DES PRODUITS D'ECHAPPEMENT DES VEHICULES A MOTEUR

- A.- Sur la santé
  - 1) Les polluants particulaires
  - 2) Les Oxydes de Carbone
  - 3) Les Oxydes d'azote
  - 4) Les Oxydants photochimiques
  - 5) Les Hydrocarbures aliphatiques
  - 6) Les odeurs désagréables
  - 7) Autres polluants
- B.- Sur la végétation
  - 1) L'ozone et les oxydants
  - 2) Les Oxydes d'azote
  - 3) Les Hydrocarbures
  - 4) Le Monoxyde de Carbone
  - 5) Les additifs pour essence

C.- Sur la faune

D.- Sur les materiaux

E.- Sur les biens

F.- Sur la visibilité

G.- Sur le climat

H.- Interactions dans le milieu

VII.- MOYENS DE PREVENTION

A.- Les moyens techniques

1) Ameliorations sans innovations technologiques
2) Ameliorations avec innovations techniques
3) Autres solutions

B.- Les mesures législatives

1) USA
2) Europe
3) Asie
4) France

C.- Le rôle de l'urbanisme

D.- La politique des transports

VIII.- NORMES DE QUALITE D'AIR AMBIANT

A.- Le Monoxyde de Carbone
B.- Les Hydrocarbures
C.- Les Oxydes d'azote
D.- Les Oxydants
E.- Le Plomb

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

INTRODUCTION

Les principales sources de pollution de l'air dans le monde sont classée de la manière suivante: combustion par les foyers fixes industriels et domestiques; procédés industriels transports de tous types

Les vehicules à moteur sont depuis un certain temps considérés comme une des principales sources de pollution atmosphérique pour les raisons suivantes:

- par leur nombre sans cesse croissant,
- par les produits d'échappement qui viennent se surajouter à d'autres polluants de l'air provenant des usines ou des chauffages locaux,
- par la formation de nouveaux corps chimiques à partir de certains produits normaux de la combustion de l'essence et du gas-oil lorsque des conditions météorologiques particulières sont réunies. Ces substances nouvellement formées sont à l'origine du brouillard photooxydant responsable de l'irritation des yeux et des dommages à la végétation.

Dans cet exposé nous nous proposons d'étudier:

- en premier lieu: les sources, la nature et la composition des gaz d'échappement des véhicules automobiles;
- en deuxième lieu: leurs effets sur les milieux vitaux;
- en troisième lieu: les moyens principaux de lutte contre la pollution due aux gaz d'échappement des véhicules.

En raison du rôle important que peuvent jouer les facteurs météorologiques dans le phénomène de la pollution atmosphérique, il nous semble utile de les porter également dans le cadre de cette étude.

Enfin, quoique les produits d'échappement des voitures ne constituent qu'une source parmi tant d'autres de la pollution atmosphérique, et que l'étude de leurs effets ne puisse être dissociée de celle des polluants de l'air dans leur ensemble, nous nous limiterons néanmoins pour la commodité de l'exposé aux effets spécifiques des principaux polluants des véhicules automobiles sur les milieux environnants.

SOURCES, NATURE ET COMPOSITION DES POLLUANTS EMIS PAR LES VEHICULES AUTOMOBILES

A.- L'AMPLEUR DU PARC DES AUTOMOBILES

Le nombre des véhicules automobiles a considérablement augmenté depuis un quart de siècle, ayant presque quadruplé dans l'espace de 20 ans, comme nous pouvons le voir dans le tableau suivant:

Nombre des véhicules automobiles en circulation dans le monde (en milliers de véhicules)

Année	Voitures de tourisme	Véhicules industriels
1948	42970	13050
1955	73440	20190
1958	86350	26110
1960	98740	28820
1965	139730	37600
1971	204100	53400

B.- LES TYPES DE MOTEUR ET LES POLLUANTS

On distingue deux types de moteurs des véhicules automobiles:

- les moteurs à essence ("à allumage commandé" ou "à allumage par bougies")
- les moteurs diésel ("à allumage par compression", "alimentés en gas-oil")

1) Moteurs à essence et leurs polluants

a) Avec les automobiles à essence, les sources d'émission des polluants sont les suivantes:

- les gaz provenant du tuyau d'échappement
- les gaz de respiration de l'évent du carter
- les hydrocarbures provenant de la ventilation du reservoir
- les hydrocarbures rejetés par le carburateur par élévation importante de la temperature sous le capot après l'arrêt, dans la demi heure qui suit.

En règle générale on ne tient pas compte des poussières provenant du frottement des pneus sur la chaussée, ni des particules d'amiante produites par l'usure des garnitures de freins

b) Selon leur source, les produits émis par les véhicules à essence se répartissent comme suit:

- produits d'évaporation du réservoir et du carburateur: 20 % des Hydrocarbures. Ce sont des substances très volatiles, entrant dans la composition de l'essence;
- sorties de gaz du carter: 25 % des Hydrocarbures, produits partiellement decomposés.

b) La composition des gaz d'échappement est la suivante:

Monoxyde de Carbone (CO)	1000 ppm
Hydrocarbures (HC)	100 - 600 ppm
Oxydes d'azote (NO_x)	10 - 1000 ppm
Formaldéhyde	5 - 20 ppm

c) La composition des gaz d'échappement varie également selon le mode de fonctionnement du moteur.

Emissions des véhicules à moteurs diésel
selon leur mode de fonctionnement

	Ralenti à vide		Charge nulle§		Demi charge§		Pleine charge§	
Nombre de temps du moteur	4	2	4	2	4	2	4	2
CO %	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,1	0,2
HC ppm	104	401	73	530	68	605	29	467
NO_x ppm	119	220	109	147	493	392	921	622

§ Pour une vitesse de 80 km/h à laquelle correspond probablement le maximum d'émission de polluants (en masse)

d) La concentration de polluants particulaires dans les produits d'échappement serait de 50 mg/m3 selon certains auteurs soit 10 millions de particules par cm3. Selon d'autres auteurs, elle serait de 50 g de particules par gallon de carburant consommé (soit environ 10 fois plus que les émissions des moteurs à essence.

e) La composition des suies ne dépend pas de la composition du combustible, elle résulte essentiellement de l'état mécanique du moteur, de la pompe d'injection, du règlage de cette dernière et de la conduite du véhicule ainsi que de la charge de celui-ci.

La combustion incomplète du gas-oil donne rapidement lieu à une émission de fumées noires immédiatement décelables à la vue et qui peut être évaluée quantitativement par l'emploi d'appareils optiques.

Il en est de même des Hydrocarbures imbrûlés qui sont des gaz nauséabondes très facilement détectés par l'odorat.

3) Autres polluants

De nombreux polluants autres que ceux dont il a été question plus haut peuvent être émis par les moteurs à explosion de tous types:

- le gas-oil contenant plus de Soufre que l'essence, il arrive que ces moteurs émettent du Dioxyde de Soufre.

- dans les émissions des 2 types de moteurs on a identifié divers Hydrocarbures polycycliques du type benzo 3,4 pyrène.

- en dehors des composés alcoylés du Plomb, divers additifs pour carburants tels que composés du Bore, du Nickel, du Baryum, du Manganèse etc. peuvent donner naissance à des produits de décomposition déversés à de très faibles concentrations dans l'atmosphère.

- sous certaines conditions météorologiques et topographiques la plupart de ces produits d'échappement - dont certains sont d'ordinaire inertes - sont réactivés et réagissent entre eux pour former de nouveaux corps jouant un rôle déterminant dans la formation du brouillard photooxydant.

VOLUMES DES EMISSIONS DE POLLUANTS PAR LES AUTOMOBILES

On ne peut pas chiffrer exactement les quantités de polluants émis annuellement par les véhicules automobiles, mais on peut faire des estimations en s'appuyant sur:

- la connaissance des proportions de polluants émis par tonne de fuel liquide ou solide consommée;
- les statistiques de consommation des charbons et des produits pétroliers.

On aura une idée de l'importance des émissions de polluants en examinant les tableaux suivants.

En France, le Comité Consultatif de l'Utilisation de l'Energie a calculé ainsi et a trouvé pour les années 1969 et 1975 les valeurs suivantes:

Estimations de quantités de polluants émis en France pour les années 1969 et 1975 en milliers de tonnes

	Particules	SO_2	CO	NO_2	Hydrocarbures
Emissions totales					
1969	361	1696	Pas d'estimation effectuée		
1975	249	2423			
dont transports					
1969	86	50	4500	580	280
1975	135	65	7000	900	430

A titre de comparaison, les tableaux suivants concernent le premier l'Etat de Californie, le second l'ensemble du territoire des Etats-Unis.

Emissions moyennes de polluants en tonnes (métriques) par jour dans l'Etat de Californie (janvier 1965)

	HC + gaz organiques	Aérosols liquides & solides	NO_x	Gaz sulfureux	CO	Totaux
Véhicules à moteur						
échappement	1270	41	445	27	9345	
gaz de carter	172	–	–	–	27	
évaporation	308	–	–	–	–	
diésel	7	2	7	2	2	
Totaux partiels	1757	43	452	29	9374	4655
Avions, bateaux et locomotives	28	11	12	–	137	
Autres sources de pollution, environ	710	63	250	247	159	
Totaux par polluants	2495	117	714	276	9670	13272
Contribution des véhicules automobiles (%)	70,5	36,8	63,0	10,5	97,0	88

Estimation des émissions pour le territoire des Etats-Unis pendant l'année 1968 (en millions de tonnes)

Sources	CO	Particules	SO_x	HC	NO_x	Total	% du total
Transports	63,8	1,2	0,8	16,6	8,1	90,5	42,3
Combustion en foyers fixes	1,9	8,9	24,4	0,7	10,0	45,9	21,4
Processus industriels	9,7	7,5	7,3	4,6	0,2	29,3	13,7
Incinération d'ordures	7,8	1,1	0,1	1,6	0,6	11,2	5,2
Divers	16,9	9,6	0,6	8,5	1,7	37,3	17,4
Total	100,1	28,3	33,2	32,0	20,6	214,2	100,0
% du total	46,7	13,2	15,5	15,0	9,6		

A noter que dans ce tableau tous les modes de transports sont considérés (terrestres, maritimes, aériens)

Pour avoir une idée de l'importance des composés de Plomb émis par les véhicules à moteur, considérons quelques chiffres donnés par les Etats-Unis en 1968 en ce qui concerne ce métal:

- Sur les 1318000 tonnes de Plomb destinées à tous usages aux Etats-Unis, une proportion de 19,9 % soit 262400 tonnes a été employée à la fabrication du Plombtétraéthyl et du Plombtétraméthyl.

- Les émissions totales de Plomb ont été estimées à 186614 tonnes sur lesquelles 180000 tonnes, soit 96,4 % proviennent des alcoylés du Plomb. La proportion de Plomb émis par les véhicules automobiles, par rapport à celle qui a été utilisée pour la fabrication des composés alcoylés du Plomb est de 68,7 %.

Avant d'aborder le chapitre des "Concentrations moyennes observées dans l'atmosphère, il convient de rappeler qu'il n'existe pas nécessairement un rapport direct entre les valeurs des volumes des polluants émis et leurs concentrations dans l'air, les fluctuations des conditions météorologiques ayant une forte influence sur celle-ci. C'est pour cette raison que nous passons en revue rapidement quelques facteurs météorologiques qui ont pu avoir une influence sur les gaz d'échappement.

LES FACTEURS METEOROLOGIQUES

A.- Conditions favorisant la dispersion des polluants

1) Le vent

Le pouvoir de dispersion des mouvements horizontaux du vent est très grand, il débute à partir de très faibles valeurs de vitesse 2 m/sec. Plus la vitesse s'élève plus le balayage des émissions est important. Les régimes des vents peuvent être modifiés par les facteurs locaux, topographiques:

- Un obstacle naturel tel une colline ou artificiel tel les grands blocs d'habitation peuvent dévier le cours du vent.
- Les vallees encaissees, une certaine répartition topographique des immeubles peuvent constituer un couloir où s'engouffrent les vents et provoquent ainsi des tourbillons de vents générateurs d'une pollution locale intense.

2) Les mouvements ascendants de l'air

D'une façon générale une ascension verticale d'une masse d'air a lieu lorsque cette masse est à une température plus élevée que l'air qui l'entoure. De ce fait à conditions météorologiques normales et si le vent est faible, les émissions de gaz s'élèvent verticalement, se détend adiabatiquement et se refroidissent. Il se forme une condensation de nuage, de vapeur d'eau, qui retombera sous forme de pluie par sursaturation.

Dans une zone polluée les masses d'air entrainent les polluants dans leur mouvement ascendant et constitue un effet de dispersion considérable.

L'effet de serre ou d'îlots de chaleur au dessus des villes est aussi favorable à la dispersion.

3) La pluie

La pluie plaque les particules au sol, elle lave et humidifie l'atmosphère, ce qui s'oppose pendant un temps au soulèvement de la poussière par le vent, enfin elle dissout certains polluants tels le Dioxyde de Soufre et le Dioxyde d'Azote et diminue de ce fait leurs concentrations dans l'air.

B.- Conditions favorisant l'accumulation des polluants

1) Le vent

Des enregistrements multiples montrent que la concentration d'un polluant déterminé varie inversement à la vitesse du vent. On voit ainsi que dans les agglomérations où le vent souffle à vitesse relativement faible, il se charge progressivement des polluants émis tout au long de son chemin et par un effet d'intégration les concentrations de ces polluants peuvent devenir très élevées, quelquefois plus élevées qu'en absence totale de vent.

2) Les inversions de températures

La température baisse régulièrement quand on s'élève en altitude jusqu'à un certain niveau où l'air commence à se réchauffer, le gradient de température s'inverse alors et devient positif. Si l'on continue à s'élever, l'air se refroidit,

le gradient de température est à nouveau négatif. La couche dans laquelle le gradient devient positif est appelée la couche d'inversion de température.

En rase campagne une telle couche se forme au voisinage du sol à la fin d'une journée ensoleillée, la surface du sol étant refroidie la première, de même que l'atmosphère à son contact. Il en résulte un brassage plus ou moins énergique des couches élevées qui peuvent être ainsi ramenées au sol. Quand le soleil se lève, réchauffe la surface de la terre, l'inversion se détruit. Mais il arrive que le réchauffement de la terre est insuffisant - en hiver, par temps couvert par exemple- les inversions durent un à plusieurs jours consécutifs. Les inversions durables s'accompagnent généralement de grands calmes. Dans les zones urbaines en raison de l'effet d'îlots de chaleur les inversions s'établissent à une altitude plus élevée qu'en rase campagne. Les émissions des gaz d'échappement des véhicules automobiles étant effectuées au ras du sol resteront prisonnières de cette couche d'inversion dans l'atmosphère des villes jusqu'à ce que l'inversion soit détruite. Les polluants qui sont entrainés par les mouvements ascendants mentionnés plus haut sont aussi arrêtés au niveau de la couche d'inversion et sont ramenés au sol par les mouvements descendants de même importance. Il en résulte que la concentration des polluants entre la couche d'inversion et le sol tend à croître dangereusement pendant toute la période de grands calmes.

C.- Conditions favorisant la transformation des polluants

Pendant la persistance de l'inversion quand la température de la vapeur d'eau atmosphérique est inférieure à la température de condensation, il se forme un brouillard chargé de tous les polluants emprisonnés. On donne à ce brouillard le nom de SMOG qui est la contraction de deux mots anglais SMOKE (fumée) et FOG (brouillard).

Le smog constitue le pire des épisodes de pollution car par son opacité il s'oppose à l'action de réchauffement des radiations solaires et contribue au maintien de l'inversion.

On distingue 2 types de smog selon la nature des polluants qu'ils contiennent:

- le smog produit par la transformation du Dioxyde de Soufre en acide sulfurique dans les noyaux de condensation est appelé smog acide. C'est à ce smog acide que sont imputables les accidents tristement célèbres qui ont endeuillé Londres, Donora, etc..

- le smog oxydant, encore appelé smog de Los Angelès car c'est là où il a été étudié pour la première fois. C'est également à Los Angelès que les conditions suivantes sont les plus fréquemment rencontrées:

  - émissions abondantes des polluants de l'automobile
  - couche d'inversion favorisant l'accroissement de leur concentration
  - forte insolation.

Lorsque ces 3 conditions sont réunies il se déclenche une série de réactions photochimiques qui aboutissent à la production d'l brouillard dans lequel se rencontrent des espèces chimiques nouvellement formées, douées de propriété oxydante.

CONCENTRATIONS MOYENNES OBSERVEES POUR LES PRINCIPAUX POLLUANTS EMIS PAR LES VEHICULES A MOTEUR DANS L'ATMOSPHERE

A.- Oxydes de Carbone

Le plus important est représenté par le Monoxyde Carbone (CO) dont la principale source d'émission est le moteur à essence.

1) A l'émission, la concentration qui est de l'ordre de quelques pourcents pour les foyers fixes peut atteindre ou dépasser 10 % dans les gaz d'échappement.

2) Dans l'environnement, le CO provenant des foyers domestiques et industriels est émis en général en altitude et est immédiatement balayé par le vent de sorte que son influence est faible au niveau de la rue. Ce n'est pas le cas du CO dans les gaz d'échappement des voitures qui, émis à ras du sol, se retrouve abondant à la hauteur des voies respiratoires des piétons.

Dans de nombreuses villes, des concentrations moyennes horaires de 50 ppm peuvent être facilement atteintes et même dépassées en certains carrefours encombrés.

A Paris, les valeurs instantanées de pointe sont:

0,21 % étaient supérieures à 100 ppm
0,01 % " " 200 ppm

Dans le tunnel de Saint-Cloud des valeurs supérieures à 200 ppm sont fréquentes et des teneurs de 250 ppm ont été observées à l'heure de pointe.

Quelques concentrations moyennes annuelles observées

- dans les grandes villes des Etats-Unis: 7 ppm = 8 mg/m3 (1964)
- à Zurich (1964-65) .....: 16 ppm = 18 mg/m3
- à Paris (1971) .....: 10 ppm = 11 mg/m3

B.- Les Oxydants: Ozone (O_3) et Nitrate de Peracétyle (PAN)

On groupe d'ordinaire dans une même étude l'ozone et le Nitrate de Peracétyle. Ce groupement résulte de ce que ces corps présentent une similitude de propriétés, éventuellement de méthodes de dosage et surtout du fait que ces corps prennent naissance simultanément au cours des reactions photochimiques qui caractérisent le smog photooxydant.

1) L'ozone

L'ozone est un constituant naturel de l'atmosphère et résulte des décharges électriques au cours des orages. Sa concentration maxima se trouve à 20 km en altitude.

Au voisinage du sol, dans les régions non polluées, sa concentration varie entre 40 et 60 ug/m3 (30 ppb au Sahara).

Des valeurs comprises entre 4 et 80 ug/m3 ont été obser-

vées à la station française à Adélie et entre 20 et 400 ug/m3 à la Jungfraujoch.

Dans les villes relativement peu polluées par les gaz d'échappement des véhicules automobiles, l'ozone réagit sur les hydrocarbures (principalement sur les oléfines) et disparait. Comme à Paris, on avait trouvé au ras du sol en 1959 des teneurs de l'ordre de 33 ppb. Vers 1962 il a été trouvé que la teneur en ozone avait diminué, la teneur reelle n'étant pratiquement plus mesurable. On en déduit, la proportion d'Hydrocarbures ayant augmenté en quelques années, que l'ozone est détruit par les oléfines, et les autres Hydrocarbures réactifs. En revanche à 30 m d'altitude, on retrouve les 30 ppb habituels et, au 1er étage de la Tour Eiffel (57 m), on a noté des teneurs atteignant 170 ppb.

Mais lorsque les conditions particulières sont rassemblées: haute pollution, insolation intense, la proportion d'ozone peut atteindre 1000 - 1200 ug/m3.

A Los Angelès durant le mois de juillet 1965, la moyenne des concentrations horaires maximales en oxydants a été de 430 ug/m3 (0,22 ppm) à 510 ug/m3 (0,26 ppm).

La concentration horaire maximale de 0,4 ppm a été enregistrée un jour à Los Angelès et 2 jours à Riverside et de 0,51 ppm à Pasadena.

Le 12 octobre 1970 à Rotterdam, une concentration inhabituelle d'ozone de 110 à 187 ug/m3 a été observée dans le centre de la ville.

2) Les Nitrates de Peracyle (PAN) de formule $R-CO-OO-NO_2$ dont le chef de file est le Nitrate de Peracyle, ont été mis en évidence pour la première fois à Los Angelès. Ce sont de nouvelles substances formées par des réactions photochimiques mettant en oeuvre les Hydrocarbures (les oléfines) et les Oxydes d'azote à haute concentration lors des périodes d'inversion persistantes.

Les concentrations observées sont de l'ordre de quelques dizaines de ppb au maximum.

Dans la ville de Gênes, en Italie, une concentration inhabituelle de 0,33 ppb de PAN a été observée.

C.- Les Aldéhydes

Les Aldéhydes sont formées par oxydation incomplète des Hydrocarbures. Sa principale source provient des gaz d'échappement des moteurs diésel. Mais dans les régions où se développent les réactions photochimiques, les Aldéhydes se forment dans l'atmosphère à partir des Hydrocarbures, principalement des Hydrocarbures éthyléniques. Les seules Aldéhydes qui ont une importance en pollution atmosphérique sont le Formaldéhyde et l'acroléine, premier terme des Aldéhydes éthyléniques.

Les concentrations horaires maximales observées de 1951 à 1957 à Los Angelès étaient de 0,20 à 1,28 ppm pour les Aldéhydes totaux.

Pour le Formaldéhyde en 1961, en fonction de l'heure les

concentrations moyennes horaires étaient:

- de 0,042 ppm de 7 à 10 heures
- de 0,051 ppm à 11 heures
- de 0,019 ppm à 16 heures

Des variations analogues dans la teneur en acroléine se situant entre 0,004 et 0,009 ppm ont été mesurées.

En général, le Formaldéhyde dépasse rarement 0,10 ppm et l'acroléine rarement 0,011 ppm.

D.- Les Oxydes d'azote (NO_x)

La majeure partie de l'azote combinée contenue dans les gaz d'échappement se présente sous forme de Monoxyde (NO). Celui-ci est ensuite transformé en NO_2 à une vitesse qui dépend des conditions atmosphériques sauf lorsque le Monoxyde est mélangé à des Hydrocarbures et exposé au rayonnement solaire, la vitesse de réaction est faible.

On a estimé que les sources naturelles émettent sur l'ensemble du globe probablement 10 fois plus de NO que les sources technologiques. Cependant, les sources naturelles sont réparties à peu près uniformement sur le globe, de sorte que la pollution de fond dont elles sont responsables est bien plus faible que la pollution due aux activités humaines, concentrées dans les zones urbaines et industrielles.

1) A l'émission, les concentrations moyennes en NO dans les gaz d'échappement des voitures non dotées de dispositifs antipollution varient selon le mode de fonctionnement du moteur Les concentrations maximales mesurées sont comprises entre 1000 et 5000 ppm.

2) Dans l'environnement, d'une manière générale, les concentrations des Oxydes d'azote sont assez peu élevées.

Aux Etats-Unis, pour le NO on a trouvé:

2,1	ppm pour	5 minutes	à Los Angelès
1,9	" "	1 heure	" Philadelphie
1,0	" "	8 heures	" "
0,6	" "	1 jour	" "
0,25	" "	1 mois	" Los Angelès
0,10	" "	1 an	" Chicago

Pour le NO_2:

1,87	ppm pour	5 minutes	à Philadelphie
2,02	" "	1 heure	" "
1,11	" "	8 heures	" "
0,70	" "	1 jour	" "
0,28	" "	1 mois	" Los Angelès
0,16	" "	1 an	" Chicago

Il convient de rappeler ici que les variations dans la journée de la concentration des Oxydes d'azote suivent le trafic automobile:

- avant le lever du soleil, le NO et le NO_2 sont dans l'atmosphère à des concentrations légèrement supérieures aux minimums journaliers.

- entre 6 et 8 heures du matin, lorsque se développe le trafic automobile, la concentration en NO augmente et une heure après environ l'énergie solaire en ultraviolet (UV) devient suffisante pour que la transformation de NO en NO_2 commence. On voit alors que la concentration en NO décroître jusqu'à des valeurs inférieures à 0,1 ppm et corrélativement, mais avec un décalage d'environ 2, 3 heures, la concentration en NO_2 croître. Le maximum est atteint vers 9 - 10 heures.

- entre 5 et 8 heures de l'après-midi le trafic automobile continue à déverser dans l'atmosphère des quantités importantes de NO alors que l'intensité solaire décroît. Il s'ensuit une nouvelle augmentation de la concentration en NO et des augmentations à peine perceptibles des NO_2 par suite du ralentissement des réactions formatrices de ce corps.

A Paris des variations analogues de concentrations en NO et NO_2 ont été enregistrées.

Les valeurs moyennes horaires des concentrations en NO_2 mettent en évidence une variation nycthémérale: la circulation automobile se fait sentir par une augmentation de la pollution le matin, en toutes saisons, et par une variation saisonnière, les valeurs mesurées en été, plus ensoleillé, étant en général plus élevées que celles de l'hiver.

E.- Les Hydrocarbures

En pollution atmosphérique on considère:

- les Hydrocarbures légers:
  + les Hydrocarbures acycliques saturés ou non
  + les Hydrocarbures alicycliques saturés ou non
  + les Hydrocarbures aromatiques

- les Hydrocarbures polycondensés aromatiques du type de benzo 3,4 pyrène, benzofluoranthène, etc. présents dans les suies noires et qui se retrouvent dans l'atmosphère sous forme de particules sédimentables ou en suspension.

1) A l'émission, les concentrations des Hydrocarbures imbrûlés dans les gaz d'échappement peuvent atteindre 1 g/m3 voire davantage.

2) Dans l'environnement, dans les agglomérations urbaines polluées on ne considère que les Hydrocarbures qui peuvent intervenir dans les réactions photochimiques.

A Los Angelès ont été trouvées les valeurs atteignant:

- 0,2 ppm pour l'éthane
- 0,12 " " l'éthylène
- 0,15 " " l'acétylène
- 0,13 " " le propane
- 0,06 " " le propylène
- 0,07 " " l'isobutane
- 0,3 " " le n-butane
- 0,06 " " l'ensemble des butylènes
- 0,4 " " l'isopentane

En ce qui concerne les Hydrocarbures polycycliques véhiculés par les particules, leur concentration dans l'atmosphère est en général très faible, de l'ordre de quelques ug/1000 m3.

F.- Le Plomb et ses dérivés

1) Concentrations moyennes observées à l'émission

Théoriquement une voiture qui consommerait 10 litres d'essence éthylée à 0,5 g de Plombtétraméthyl $Pb(C_2H_5)_4$ par litre, verrait la concentration de Plomb dans son gaz d'échappement atteindre 25 à 30 mg au m3 environ.

Il convient de rappeler ici que les particules renfermant le Plomb sont en général de très faibles dimensions et en principe inférieures à 5 microns. Il semble que la teneur des particules en Pb est d'autant plus élevée que leur diamètre est plus petit. On a constaté par exemple, dans les poussières en suspension à Los Angelès que 90 % du Pb atmosphérique se trouve dans des particules de moins de 1,6 microns.

2) Dans l'environnement, en plein milieu du Pacifique la teneur de Plomb est de l'ordre de 0,0003 à 0,015 ug/m3 d'air, les valeurs les plus élevées obtenues près de la Californie. Il s'agissait là de Plomb minéral porté par les poussières véhiculées par les vents.

Une concentration en Plomb organique de 0,078 ug/m3 a été obtenue à 250 m du croisement des 2 voies importantes à Los Angelès.

Diverses mesures varient entre 0,047 - 0,106 ug/m3.

Pour le Plomb minéral particulaire des valeurs allant de 1,96 à 6,80 ug/m3 ont été trouvées (moyenne 3,55 ug/m3).

Il a été trouvé dans "l'étude des 3 cités" que la concentration la plus élevée de Plomb se rencontrait dans l'air pendant l'automne et l'hiver. La valeur la plus élevée était:

2,4 ug/m3 pour Cincinnati
3,8 ug/m3 " Philadelphie
4,1 ug/m3 " Los Angelès

Les valeurs maximales mensuelles pour les trois mêmes cités sont dans l'ordre: 3,1; 4,4; et 6,4 ug/m3; et la concentration la plus élevée dans l'échantillon: 6,4; 7,6 et 11,4 ug/m3.

La valeur moyenne annuelle:

2 ug/m3 pour le centre de la ville et les zones industrielles de Cincinnati
1 ug/m3 pour les faubourgs de cette ville;

Philadelphie: 3 et 1 ug/m3 respectivement
Los Angelès: 3 et 2 ug/m3.

Dans d'autres villes des valeurs suivantes ont été observées:

Tokyo: 1,0 à 10,0 ug/m3
valeur extrême: 25 ug/m3

Francfort: 46 ug/m3 pendant 1 heure

Paris: 0,8 - 11,5 ug/m3.

On a pu établir une corrélation intéressante entre la concentration du Plomb dans l'air et celle de CO au même endroit.

Cette corrélation s'exprime par la relation:

$$Pb\ (ug/m3) = 0,6\ CO\ (ppm)$$

Des études conduites en des endroits distincts de la capitale ont montré des corrélations serrées entre la teneur en Plomb et la teneur en CO, mais le coefficient de proportionnalité entre les 2 grandeurs a varié d'un site à l'autre.

SURVEILLANCE DES NIVEAUX DE POLLUTION

A.- Les principaux objectifs

Les principaux objectifs des enquêtes sur la qualité de l'air et des réseaux d'observation sont:

1- Recueillir des données de base,
2- Signaler les épisodes aigus de pollution,
3- Déterminer le degré de pollution de l'air ambiant et établir un rapport entre ce degré et les conditions d'exposition,
4- Apprécier les effets des mesures préventives et le respect des normes de pureté de l'air en vigueur.

B.- Les methodes d'étude comportent:

1) L'étude des conditions météorologiques générales avec l'établissement des roses des vents et des histogrammes de répartition de leurs vitesses. Il faut rassembler les données météorologiques des années passées et dresser les diagrammes polaires de repartition de fréquence avec laquelle les vents soufflent dans une direction donnée pour au moins 5 sinon 10 des années qui ont précédé celle où l'étude est entreprise.

Ce travail effectué, on peut envisager d'établir:

2) Le programme des mesures proprement dites

a) Le sondage rapide ou méthode des prélèvements instantanés isolés.

Avant d'implanter un réseau plus ou moins serré de surveillance nécessitant personnel et matériel, il est bon de procéder à des sondages par des déterminations préliminaires. Ces déterminations instantanées isolées peuvent résulter d'un prélèvement rapide fait en sac ou encore du passage d'une petite quantité d'air au travers d'un tube réactif.

Si l'on dispose d'un camion-laboratoire équipé que l'on fait stationner en divers lieux, il est recommandé de faire des prélèvements d'une durée moyenne de 8 heures consécutives pour le CO et de 24 heures pour le SO_2 et les poussières. Mais si l'on ne dispose pas d'un camion-laboratoire, les prélèvements peuvent être faits à bord d'une simple voiture et leur durée doit alors être limitée par exemple à 1 heure.

Dans tous les cas, le matériel nécessaire comprend des pompes du type à membranes, compteurs volumétriques secs, des débitmètres, des sacs imperméables, des flacons barboteurs etc. Les contenus des sacs ou des flacons barboteurs seront ensuite examinés en laboratoire.

En général et dans un premier temps les investigations peuvent être limitées à l'estimation du SO_2, des fumées et poussières et du CO.

b) Les prélèvements instantanés isolés cités plus haut servent non seulement à faire des déterminations préliminaires,

mais aussi à mesurer les changements du degré de pollution en fonction des fluctuations de la densité de la circulation au cours d'une même journée ou encore à compléter les observations effectuées par un réseau fixe d'échantillonnage.

c) Etablissement d'un réseau de prélèvements

S'il est décidé d'aller plus avant dans la connaissance des niveaux de pollution il devient nécessaire d'implanter un réseau de prélèvements.

Il faut choisir des sites en nombre suffisant et correctement distribués où des prélèvements continus et automatiques pourront être effectués. Les conditions auxquelles doivent satisfaire de tels sites ne sont pas normalisées à l'échelon international. Il semble qu'une densité de 1 site par 2 km2 est la plus préferable.

S'il s'agit de surveiller une source isolée, les emplacements peuvent être répartis sur des cercles concentriques dont le rayon croît régulièrement d'un cercle au suivant, et admettant la source pour centre. La densité linéaire des sites sur les cercles sera plus élevée sous le vent dominant de la source sans pour autant négliger d'en répartir, mais en moindre nombre dans les autres directions.

Dans le cas des sources diffuses les sites doivent être répartis aussi uniformément que possible, à moins que l'étude des vents n'ait fait ressortir un régime particulier avec direction très privilégiée. Dans les agglomérations urbaines les véhicules automobiles constituent des sources mobiles qui posent des mêmes problèmes que la présence de multiples sources fixes. Pour l'étude de la pollution de l'air par les gaz d'échappement des véhicules automobiles, le Laboratoire Central de la Préfecture de Police a fait implanter 317 sites dans la capitale et prélever 15200 environ d'échantillons d'air par an pendant plus de 10 ans; ensuite il a fait installer un reseau de 11 appareils automatiques donnant la moyenne horaire en CO aux points d'implantation.

Les émissions des véhicules sont effectuées au ras du sol mais à cause des phénomènes de turbulence provoques par les véhicules le plus haut niveau des concentrations se trouve à la hauteur de l'air respiratoire d'un homme de taille moyenne. C'est pour cette raison que les prélèvements se font à 1,60 m du sol.

d) Choix des méthodes d'analyse

Les méthodes d'analyse des polluants de l'air vont de techniques chimiques très simples à des procédés extrêmement complexes nécessitant l'emploi d'appareils compliqués. Remarquons que dans l'étude de la pollution atmosphérique d'une ville les méthodes destinées à la mesure des concentrations de polluants dans l'air doivent être beaucoup plus sensibles que celles utilisées dans la détermination des teneurs de polluants contenus dans les effluents notamment dans les gaz d'échappement des véhicules.

Par exemple, pour mesurer la teneur du CO dans l'environnement il faut des méthodes qui donnent des résultats précis

pour des valeurs comprises entre 2 et 250 mg/m3 (1 - 200 ppm). Alors que pour mesurer la concentration du même gaz à son émission une méthode capable de mesurer des valeurs de l'ordre de 1 - 11 % est considérée comme suffisamment sensible.

Le choix des techniques d'analyse doit encore tenir compte de l'interaction des substances qui peuvent être rencontrées simultanément dans l'atmosphère urbaine et des conditions diverses qui peuvent induire en erreur dans l'interpretation des résultats.

e) Mesures biologiques de l'exposition à la pollution

L'un des principaux objectifs des enquêtes est d'établir un rapport entre les concentrations des polluants dans l'atmosphère et la nuisance à laquelle l'organisme est effectivement exposé. Pour cela, chaque fois que cela est possible il faut compléter des déterminations physicochimiques par des mesures biologiques qui permettront d'apprecier le degré d'exposition. Mais là encore dans ce domaine il faut tenir compte du fait que certains indices ne sont pas spécifiques.

f) Analyse des fumées et des gaz d'échappement

L'observation à l'oeil nu est sans doute encore la meilleure méthode pour évaluer l'émission de quantités excessives de fumées par les moteurs diésel. L'inconvenient est sa subjectivité et il est difficile de comparer les résultats venant des observateurs différents.

Les méthodes objectives consistent à mesurer soit la coloration de la tache obtenue sur papier filtre, soit la baisse d'intensité d'un faisceau lumineux.

La méthode la plus courante a fait l'objet de la norme AFNOR - NFX 43005. C'est la technique dite de détermination de la teneur en fumées noires. Elle consiste à filtrer l'air sur un papier filtre et à estimer par réflectométrie l'intensité de la tache ainsi formée.

Un appareil automatique met à profit l'absorption d'un rayonnement béta issu d'une source de Prométhéum 147 traversant les poussières recueillies sur papier filtre. Une soustraction électronique retranche de la mesure la part qui revient à l'absorption due au seul papier filtre. Ces appareils ne tiennent compte que de la densite de la fumée.

L'opacimètre Hartridge a été conçu pour mesurer l'opacité des fumées émises par les véhicules automobiles de tous types. L'appareil est un photocolorimètre pourvu d'un tube laboratoire dans lequel on fait passer la totalité des gaz émis par le moteur. On mesure l'opacité par le moyen d'une source lumineuse et d'une cellule photoélectrique. L'appareil est gradué en 100 divisions, la division 0 correspond à l'absence totale de poussière et la division 100 à l'opacité totale de la colonne de fumée.

La mesure de l'odeur demeure un problème à résoudre. On s'efforce d'établir une corrélation entre la perception par l'homme de l'odeur des gaz d'échappement de moteurs diésel et leur composition chimique.

3) La réduction de la visibilité

On n'a pas encore d'instruments satisfaisants pour évaluer convenablement la réduction de la visibilité due à la pollution de l'air. Trois types d'appareils sont couramment utilisés pour des mesures de ce genre: transmissiomètre, télé-photomètre et photomètres solaires.

Noyau de condensation: il existe plusieurs instruments permettant de mesurer les noyaux de condensation.

4) Indicateurs végétaux de la pollution atmospherique

Certaines plantes ont été utilisées comme indicateurs permanents du degré de pollution. Dans ce domaine il faut faire appel à un botaniste spécialisé en pathologie végétale pour différencier les effets dus à la pollution de ceux dus aux maladies ou aux changements de climat et des conditions du sol. Il faut éliminer avant tout les causes possibles des effets observés: maladies, insectes, traitements traditionnels, etc.. Le degré de pollution est alors jugé sur les modifications de leurs fonctions vitales: la nutrition, la croissance et la reproduction ou sur celles de leur aspect: nécrose, malformation On retrouve ces mêmes principes dans l'évaluation des effets des polluants sur les êtres humains et les animaux.

EFFETS DES PRODUITS D'ECHAPPEMENT DES VEHICULES A MOTEUR

Ce sont les effets spécifiques de chacun de ces polluants qui seront traités dans ce chapitre.

A.- Sur la santé

L'air constitue un des éléments fondamentaux de tout être vivant. Chaque jour nous respirons de 10 à 15 m3 d'air. La quantité des polluants qui pénètrent dans l'organisme dépend de la durée de l'exposition, de la concentration des produits dans l'atmosphère, et pour certains d'entre eux du volume d'air inspiré.

Les effets des polluants atmosphériques sur l'organisme humain sont étudiés:

- par des mesures des concentrations d'une substance et de ses métabolites dans le sang ou dans les excrétions;

- par l'étude clinique des manifestations morbides;

- par des études expérimentales sur des volontaires ou sur les animaux de laboratoire.

On peut déterminer à quelle concentration les divers polluants produisent des effets nocifs, mais uniquement d'après les résultats d'expériences sur des sujets normaux;

- par l'étude épidémiologique qui consiste à étudier l'effet des fluctuations de la pollution de l'air ambiant sur l'ensemble de la population ou sur les groupes choisis et définis, des sujets particulièrement sensibles comme les enfants, les personnes âgées et malades.

Il ne faut pas perdre de vue d'autres facteurs auxquels les effets de la pollution sont étroitement liés comme le terrain, la situation socioéconomique de l'individu.

- Il faut distinguer des groupes de la population qui par leur profession sont particulièrement exposés à certains polluants et de ce fait ont une concentration plus élevée que la population générale. Les concentrations admissibles dans l'industrie ne doivent pas servir de références dans la lutte contre la pollution de l'air.

- En revanche, des difficultés d'un autre ordre viennent compliquer l'étude des effets de la pollution dans le milieu professionnel. En effet, les travailleurs constituent un sous groupe spécialement sélectionné et en bonne condition physique. Ils diffèrent sur des points évidents de la population générale qui comprend des enfants, des sujets âgés et des malades.

1) Les polluants particulaires

Les principaux polluants particulaires émis par les véhicules automobiles sont la fumée des moteurs diesel et le Plomb provenant des produits ajoutés à l'essence.

La fumée des moteurs diesel résulte d'une combustion incomplète du gas-oil provenant d'un mauvais règlage, de l'usure

ou d'une utilisation incorrecte du moteur. Elle renferme des agrégats de particules de Carbone (la suie) sur lesquels les résidus de l'huile non brûlée, les Hydrocarbures aromatiques polycondenses du type benzo 3,4 pyrène peuvent être adsorbés.

a) Plomb

1°- Plomb organique

Le Plomb organique est un poison du système nerveux et bien connu en pathologie du travail. Mais aux concentrations où il se trouve dans l'air des villes (0,078 ug/m3) on n'a jamais mis en évidence aucun effet de cetype de composé.

2°- Plomb minéral

Le Plomb ajouté sous forme organique - tétraéthyl ou tétraméthyl - à l'essence pour son pouvoir indétonnant est émis pour une large part sous forme d'Oxydes ou de sels minéraux. La plupart des particules ont un diamètre inférieur à un micron.

Chaque jour un homme respire 12 m3 d'air. Les teneurs en Plomb dans l'atmosphère des villes observées varient de 1 à 10 ug/m3 d'air et peuvent aller jusqu'à 25 ug/m3. Mais la moyenne est de 2 - 4 ug/m3. On peut donc évaluer à 20 - 80 ug par jour la quantité moyenne de Plomb inhalé, sur laquelle 25 - 50 % peuvent être absorbés. La nourriture, la boisson, la fumée de tabac apportent 300 ug de Plomb par jour sur lesquels 5 - 10 % seront absorbés de sorte que le Plomb provenant des voitures peut être compté pour le quart de la charge totale en Plomb de l'organisme. Dans une ville moderne, chez un sujet non exposé professionnellement les concentrations sanguines sont de l'ordre de 15 - 40 ug/100 ml. Les concentrations sont plus élevées chez l'homme que chez la femme, plus élevées chez les citadins que chez les ruraux. Mais le rapport significatif entre les concentrations observées et l'exposition aux produits d'échappement n'a pu être établi. Une étude effectuée à Los Angelès a montré que les habitants près des grands axes routiers présentaient une concentration sanguine en Plomb un peu plus élevée que les habitants près de la côte. Cela peut résulter de l'exposition à un air pollué mais, dans l'état actuel des connaissances, il ne saurait être tenu pour une preuve de l'existence d'un réel danger.

En ce qui concerne les excrétions urinaires de coproporphyrine III ou d'acide delta-amino-lévulinique, termes du métabolisme du Plomb, on a constaté qu'il n'y a pas d'augmentation significative de ces excrétions chez les habitants des grandes villes. De même que chez les agents de police qui passent toute leur journée dans les rues ces chiffres ne dépassent pas la normale. Toutefois on ne peut pas en conclure qu'il n'existe aucun autre trouble du métabolisme dû à l'absorption de Plomb.

Il semble aujourd'hui que rien ne demontre la nocivité du Plomb des gaz d'échappement mais il faut garder à l'esprit la possibilité d'une manifestation lointaine d'effets morbides. En effet, à côté d'une accumulation sans signes mesurables d'intoxication il peut y avoir une libération des polluants ainsi accumulés à l'occasion d'une infection ou de conditions biochi-

miques anormales qui donne lieu à des manifestations pathologiques.

b) Hydrocarbures polycycliques

La présence des Hydrocarbures polycycliques dans les poussières en suspension pose la question de l'origine du cancer. En effet, à partir des produits isolés provenant des gaz d'échappement on a pu reproduire expérimentalement chez des souris et des rats des cancers cutanés typiques vérifiés à l'examen microscopique et qui tuaient l'animal par métastases généralisées. Truhaut en 1960 a obtenu des cancers cutanés typiques chez des souris par badigeonnage avec des poussières atmosphériques de Paris. Kotin et ses collaborateurs ont également démontré qu'en plus de leur composition chimique, les propriétés physiques telles la taille et la structure des polluants atmosphériques représentent un facteur important dans la reproduction des tumeurs malignes expérimentales. Ils ont mis en évidence l'entrée des particules de suie à l'intérieur des cellules du tractus respiratoire de souris, de rats et de lapins d'expérience. Les protéines cellulaires et plasmatiques favorisent l'élution et la libération des Hydrocarbures adsorbés sur des particules de suie.

Les mêmes corps cancérigènes ont été retrouvés chaque fois qu'ils ont été recherchés dans l'air des villes et dans les tumeurs provoquées. Enfin le benzo 3,4 pyrène a été identifié par Mallet et Mme Héros dans les tissus ganglionnaires, pulmonaires et médiastinaux, abdominaux et inguinaux, dans le foie et le rein.

Cependant on n'a jamais pu reproduire expérimentalement de cancer bronchopulmonaire par simple inhalation chez aucun animal. En revanche, certaines races de souris chez lesquelles on observe fréquemment l'apparition spontanée de tumeurs bénignes des bronches de type adénome ou adénome kystique, en ont beaucoup plus souvent si on les met dans une atmosphère polluée. De même que certaines races de souris normalement réfractaires à de telles tumeurs en sont atteintes dans la proportion de 15 à 20 % si elles sont exposées aux atmosphères polluées.

Il ressort de nombreuses études statistiques et épidémiologiques qu'il existe une corrélation entre les taux standardisés de cancer bronchopulmonaire et la consommation en fumée de tabac. Quant à la responsabilité certaine des gaz d'échappement des véhicules automobiles, elle n'a pu être affirmée dans l'état actuel des connaissances scientifiques, d'autant plus que dans ce domaine si ces polluants contribuent à l'étiologie de la maladie, leur rôle est relativement faible par rapport à celui des fumées de cigarette.

c) Une mention doit être faite à propos de l'amiante dont l'usage est de plus en plus répandu en particulier dans la garniture des freins et des embrayages des véhicules. Ces particules de l'amiante sont responsables d'un très grand nombre de tumeurs, plus encore que les Hydrocarbures. De même, les particules de noir de charbon (carbon black) utilisé dans les gommes des pneus des voitures, par leur pulvérisations extrêmement fines dues à l'usure, les particules de goudron produites par

frottement des pneus sur la chaussée peuvent pénétrer dans les voies respiratoires et seraient également responsables d'un très grand nombre de tumeurs malignes.

En somme, il est incontestable qu'en permanence sont en suspension dans l'atmosphère urbaine des corps dont le pouvoir cancérigène est certain et prouvé expérimentalement. Il est d'autre part prouvé que le nombre des cancers bronchopulmonaires est en augmentation réelle et constante, indépendamment de l'augmentation de la durée de vie, des facilités et des perfectionnements des moyens de dépistage, de la plus grande vigilance de la population pour sa santé. Mais il est impossible dans l'état actuel des connaissances scientifiques d'infirmer ou d'affirmer l'existence d'une relation entre ces deux constatations.

Il est en revanche possible d'imaginer un processus à plusieurs étapes qui a été démontré par Kotin et ses collaborateurs:

- Dans un premier stade: les polluants atmosphériques provoquent une agression de la muqueuse bronchique. Si cette agression est de courte durée aucune manifestation pathologique n'est observée. Dans le cas contraire ont lieu des modifications structurales puis fonctionnelles: les cils perdent de leur mobilité, voient leur fonction ralentie puis détruite.

- Dans un deuxième stade: la muqueuse subit une métaplasie donnant naissance à une structure tissulaire tout à fait différente du tissu original. Cette métaplasie est considérée par beaucoup d'auteurs comme une lésion précancéreuse.

C'est à ce stade qu'interviennent les différents polluants dans leur action cancérigène. L'état pathologique résulte vraisemblablement de leur sommation ou de leur induction.

2) Les Oxydes de Carbone

a) Dioxyde de Carbone CO_2

Terme normal de toute combustion organique, le CO_2 est considéré comme dénué de toxicité sur l'homme.

Dans un but d'hygiène, on recommande de ne pas dépasser la teneur de 1 pour 1000 (1000 ppm) dans les atmosphères confinées résultant de la vie en commun dans un espace clos.

Les teneurs que l'on trouve dans l'atmosphère des villes ne présentent aucun caractère de gravité et il faut atteindre plusieurs pourcents pourque les effets physiologiques se fassent ressentir, débutant par une accélération du rythme de la respiration et pouvant entrainer des troubles plus ou moins graves si la concentration continue à croître.

b) Monoxyde de Carbone CO

1° Rappel de la cinétique de la réaction entre le CO et l'hémoglobine (Hb)

Un des principaux polluants émis par les véhicules à moteur, le CO est très toxique par son affinité avec l'hémoglobine (210 fois supérieure à celle de l'oxygène).

Le principal résultat de cette combinaison dans le sang est la diminution de l'aptitude du sang à transporter l'oxygène aux tissus. Cette capacité est encore réduite par le fait que la présence de CO gêne la dissociation de l'oxyhémoglobine par l'effet Haldane.

Le pouvoir de fixation de CO sur l'hémoglobine dépend en pratique de la pression partielle de CO dans l'air respiré, de la durée de l'exposition, de la ventilation pulmonaire, laquelle est en grande partie liée à l'activité du sujet.

Il convient de se rappeler que ce gaz est naturellement présent dans le sang à la concentration de 0,8 %. Cette valeur est plus élevée chez les fumeurs. Lorsque la pression partielle ou la concentration de CO dans l'air ambiant est inférieure à la valeur d'équilibre dans le sang on observe une dissociation de carboxyhémoglobine COHb. Le sujet expire du CO. De même chez une personne qui absorbe du CO, le temps nécessaire pour que l'état d'équilibre soit rétabli dépend de la concentration sanguine initiale. Chez un sujet au repos il faut environ 3 heures pour que la carboxyhémoglobinémie atteigne 50 % de la valeur d'équilibre, mais le taux d'élimination du CO est augmenté par l'exercice et l'inhalation d'air enrichi en oxygène.

Il est intéressant de trouver dans le tableau suivant les relations entre certaines concentrations ambiantes de CO, la durée d'exposition, et les taux sanguins. On suppose que la saturation initiale en CO est virtuellement de zéro ou "basale" et que le sujet s'adonne à une activité légère.

Relation entre les concentrations ambiantes de CO, la durée d'exposition et les taux de Carboxyhémoglobine §

CO ambiant		Taux de Carboxyhémoglobine (%) à		
mg/m3	ppm	1 heure	8 heures	équilibre
117	100	3,6	12,9	16,0
70	60	2,5	8,7	10,0
35	30	1,3	4,0	5,0
23	20	0,8	2,8	3,3
12	10	0,4	1,4	1,7

§ On suppose un sujet moyen s'adonnant à une activité légère et présentant une valeur initiale "basale"

Le tableau suivant montre pour 3 concentrations ambiantes de CO, le temps nécessaire pour que le sang atteigne une saturation de 4 %. Le choix de cette valeur est motivé par le fait que les chiffres supérieurs semblent bien accroître le risque pour les malades atteints d'une affection cardiovasculaire.

Concentrations de CO nécessaires pour porter le taux de COHb à 4% §

CO ambiant mg/m3	CO ambiant ppm	Temps heures
29	25	24
35	30	8
117	100	1

§ On suppose une activité légère au niveau de la mer et des valeurs initiales "basales". Au dessus de 4 %, le risque peut être accru pour les malades atteints d'affections cardiovasculaires.

L'exposition au CO de l'air n'élève pas nécessairement le taux sanguin. Par exemple une exposition continue à 25 ppm de CO aboutira à une saturation de 4 % quelle que soit la concentration sanguine initiale. Une personne dont la saturation initiale étant inférieure à 4 % absorbera le gaz alors qu'un fumeur dont la saturation initiale dépassait 4 % en excrètera jusqu'à ce soit atteint un équilibre à 4 % à condition qu'il ne continue pas à fumer.

Chez les fumeurs on a observé des concentrations sanguines de CO dépassant une saturation de 15 %.

[illegible]

+) Effets sur la fonction psychomotrice

Dans l'atmosphère des villes les doses de monoxyde de carbone susceptibles d'entrainer des intoxications aigues mortelles ne sont jamais atteintes. Les quelques effets aigus et chroniques examinés ici peuvent être dus simplement à l'anoxie relative provoquée par ce gaz.

Mc Farland et collaborateurs (1944) ont montré que le seuil de vision était élevé en faible illumination aux concentrations de 5 %.

Lindgren (1961) a signalé des manifestations telles que céphalées et lassitude aux concentrations supérieures à 10 %.

Schulte (1963) et Beard & Wertheim (1967) ont démontré à ces taux, l'existence des troubles de la perception et un abaissement des performances.

Guest et collaborateurs (1970) utilisaient une technique à double insu pour étudier les seuils de fusion visuels et auditifs après exposition à [illegible] de CO pendant 1 heure. Ils n'ont observé aucun effet alors que ces seuils étaient élevés par l'administration préalable de 60 mg Phénobarbital.

Stewart et collaborateurs (1970) ont mis en évidence des maux de tête et une diminution de la coordination manuelle à des valeurs allant de 15 à 20 % de COHb.

Hosko (1970) a montré que des taux de COHb dépassant 20 % altèrent les réponses aux stimuli visuels mais que l'activité électro-encéphalo-graphique (E E G) spontanée n'est pas

modifiée jusqu'à une concentration voisine de 33 %.

D'après ces études, les résultats des épreuves de la fonction psychomotrice ne doivent jamais être interprétés d'après le taux de CO seul. En effet, des concentrations trop faibles pour entraîner à elles seules des altérations mesurables pourraient, dans d'autres épreuves, se révéler capables d'exercer des effets sur des sujets soumis au stress ou ayant préalablement absorbé de l'alcool, des sédatifs, des antihistaminiques ou des médicaments hypotenseurs.

De même des concentrations sanguines de COHb de 3 à 4 % comme peut en produire une exposition aux gaz d'échappement, qui n'exercent aucun effet psychomoteur chez des sujets bien portant pourraient entraîner une réduction minime de la capacité d'oxygénation du sang mais capable cependant de précipiter ou d'aggraver une atteinte du système nerveux central ou de l'appareil cardiovasculaire.

+) Effets sur l'appareil cardiovasculaire

Le CO peut avoir des effets importants sur l'appareil cardiovasculaire et sur l'oxygénation des tissus autres que ceux du système nerveux central.

Chevalier et collaborateurs (1966) ont étudié les réactions au CO de non fumeurs et ont mis en évidence une augmentation de la dette en oxygène lors des exercices physiques pratiqués à des saturations en COHb voisines de 4 %.

Ayres et collaborateurs (1965, 1969) ont signalé une diminution de la pression partielle de l'oxygène du mélange artérioveineux chez des sujets présentant un taux de COHb voisin de 9 % et ils pensent que cette baisse de P_{O2} pourrait expliquer les modifications cardiaques et l'augmentation de la dette en oxygène.

Ces mêmes auteurs (1970) ont noté que les différences artérioveineuses d'oxygène dans les artères coronaires étaient uniformément augmentées et le débit coronaire accéléré lorsque la carboxyhémoglobinémie atteignait des valeurs de 5 à 10 %; en outre des altérations myocardiques notables ont été observées chez des malades dont la COHb dépassait 6 %.

On a aussi étudié le rôle éventuel de CO dans la génèse de la maladie par opposition à l'exacerbation d'une affection ou d'un trouble fonctionnel préexistants. Les recherches d'Astrup et collaborateurs (1967) sur les lapins semblent avoir un grand intérêt et contribuer à l'étude de l'étiologie de certaines maladies cardiovasculaires. Ces auteurs ont trouvé une incidence accrue des athéromes chez les lapins ingérant du cholestérol et exposés au CO en même temps. Les altérations produites dans les parois vasculaires les ont conduits à supposer que la relation observée entre les maladies cardiovasculaires et l'usage de la cigarette pourrait bien s'expliquer par l'exposition chronique ou répétée au CO. A la suite de ces études, l'examen de 1000 ouvriers d'usine, choisis au hasard à Copenhague (Kjeldsen, 1969) a fait apparaître une relation nette entre les concentrations élevées de COHb chez les fumeurs et la

fréquence de l'artériosclérose. Dans l'état actuel des connaissances scientifiques, rien ne permet de savoir si la vie quotidienne dans une atmosphère constamment polluée ne provoque pas des réactions de même ordre.

3) Les Oxydes d'azote (NO_x)

Le Dioxyde d'azote (NO_2) est 4 fois plus toxique que le Monoxyde d'azote (NO) et 10 fois plus toxique que le Monoxyde de Carbone.

Les effets observés sur l'homme pour des niveaux de concentrations rencontrées dans l'atmosphère des villes polluées ont été les suivants:

L'odeur est perçue distinctement par quelques sujets à partir du seuil de 0,12 ppm; par un peu plus de la moitié pour 0,22 ppm; et par tous les sujets à partir de 0,42 ppm.

Des sujets sains ou présentant des maladies pulmonaires chroniques de "modérées à marquées" ont été exposés à des concentrations variant de 0,5 à 3 ppm de NO_2, à différentes occasions pendant 2 à 3 heures. Il n'a été enregistré chez ces volontaires aucune modification significative de la résistance pulmonaire, du pouls et de la vitesse de la respiration.

Sur les enfants d'âge scolaire, ceux exposés à l'atmosphère plus polluée par NO_2 manifestent une plus grande tendance à l'infection pulmonaire.

4) Les Oxydants photochimiques

Les Oxydants photochimiques sont responsables de la formation du brouillard photochimique oxydant et ont pour origine les gaz d'échappement des véhicules automobiles.

Le phénomène dans lequel le Dioxyde d'azote intervient comme "sensibilisateur photochimique", apparait par des temps chauds, fortement ensoleillés, produit à partir des Hydrocarbures de corps tels que l'ozone, les Nitrates de Peracyle (PAN) les Aldéhydes et d'autres composés chimiques complexes. Ces composés chimiques oxydants sont mesurés par diverses méthodes mais exprimés en ozone O_3.

On a recours à des études épidemiologiques pour déterminer si ces oxydants photochimiques aux concentrations observées dans les villes exercent des effets nocifs sur la santé humaine.

a) Effets aigus: mortalité

Aucune relation de causalité n'a été mise en évidence entre l'accroissement de la mortalité et les jours où les taux d'oxydants atteignaient des valeurs de 1,50 à 0,90 ppm.

b) Effets aigus sur l'appareil respiratoire

Motley et collaborateurs (1959) ont constaté une diminution de la fonction pulmonaire chez les personnes atteintes de pneumopathie chronique lorsqu'elles étaient exposées au smog photochimique, les concentrations d'Oxydants observées étaient de 390 à 1370 ug/m3 (0,2 à 0,7 ppm). Dans une atmosphère filtrée les fonctions respiratoires s'amélioraient mais elles s'abaissaient à nouveau au retour à l'air pollué.

Rokaw et Massey (1962) ont observé dans une étude similaire que l'exposition de tels sujets à des concentrations de 120 ug/m3 (0,06 ppm) n'avait pas d'effet aggravant sur leur fonction pulmonaire.

Une corrélation statistiquement significative a été établie entre la fréquence des crises d'asthme et les taux d'Oxydants supérieurs à 500 ug/m3 (0,25 ppm). Il n'en est rien quand les taux sont de 260 ug/m3 (0,13 ppm) (Schoettlin et Landau, 1961). Il n'y avait pas de corrélation notable entre le nombre de sujets affectés et les taux de CO et de substances particulaires.

Schoettlin en 1962 a fait une enquête parmi les hommes de plus de 60 ans dans la région de Los Angelès. La moitié de la population étudiée présentaient une affection pulmonaire chronique. La comparaison était faite avec un groupe de témoins en fonction de l'âge et de l'usage du tabac. Il est apparu que dans le groupe des malades le pourcentage de la variation des symptômes était significativement plus élevé que celui observé dans le groupe témoin. Les valeurs des concentrations d'Oxydants responsables dans les études citées étaient comprises entre 60 et 1350 ug/m3 (0,03 et 0,69 ppm).

c) Performances athlétiques

Les performances athlétiques étaient étudiées comme les temps réalisés dans diverses circonstances par les coureurs de fond. Si l'exposition à des concentrations supérieures à 200 ug/m3 (0,1 ppm) est faite 1 heure avant la course, les temps étaient moins bons; à 2 ou 3 heures avant ou pendant la course elle n'avait pas le même effet.

Les Oxydes d'azote, le Monoxyde de Carbone et les particules en suspension aux concentrations mesurées ne provoquaient pas l'abaissement des performances.

d) Effets chroniques

Les variations brusques de concentrations ont un effet nocif démontré mais aucune association entre les maladies chroniques et les concentrations stables d'Oxydants n'a encore été prouvée.

e) Gêne

On observe que le brouillard photochimique oxydant occasionne généralement des irritations de la gorge, du nez, des yeux allant jusqu'au larmoiement.

f) Etudes expérimentales

Les résultats des études expérimentales concordent avec les manifestations observées plus haut.

1° Action de l'ozone

Aucun effet apparent n'a été observé pour des expositions de sujets normaux à l'ozone pendant des périodes prolongées pour des concentrations allant jusqu'à 390 ug/m3.

Le niveau à partir duquel une irritation nasale et de la gorge apparait semble se situer aux alentours de 590 ug/m3 (0,3 ppm).

En ce qui concerne des expositions de courte durée on a pu résumer les observations comme suit:

- des concentrations de 200 à 780 ug/m3 (0,1 à 0,4 ppm) pendant 1 heure ne semblent pas avoir produit d'effets.

- des expositions à des concentrations de 980 à 1960 ug/m3 (0,5 à 1 ppm), pendant une période de 1 à 2 heures produisent des modifications de la fonction pulmonaire: accroissement de la résistance pulmonaire, diminution de la capacité vitale et réduction du volume d'air expiré à force (jusqu'à 20 % du volume avec une concentration de 980 ug/m3).

- certaines personnes sont capables de tolérer des concentrations allant de 1960 à 5900 ug/m3 (1,0 à 3,0 ppm) pendant des périodes de 2 heures. Il s'ensuit une fatigue extrême et une aptitude à coordonner des mouvements.

2° Action des Oxydants en bloc c'est à dire de tous les produits qui concourent à la formation du brouillard oxydant ozone et nitrates de peracyle etc..

Bien que l'ozone soit le principal oxydant, responsable des effets observés, on note les détails suivants:

- la principale réaction est le développement d'une irritation de la muqueuse oculaire pouvant entrainer un larmoiement;

- l'ozone n'est pas un irritant de l'oeil, mais il n'en est pas de même de l'acroléine, du PAN, du PBZN (perbenzoyl), et des aldéhydes.

Le PBZN aurait un pouvoir irritant 200 fois plus grand que celui de formol. En fait on pense aujourd'hui que d'autres substances non encore identifiées ont pu donner à ce brouillard photooxydant la propriété d'être un irritant de l'oeil.

- les aldéhydes, particulièrement la formaldéhyde et l'acroléine sont doués d'une propriété physiologique qui est l'irritation sur la muqueuse de l'oeil, du nez, de la gorge et sur la peau.

La formaldéhyde est détectable par son odeur à des concentrations de l'ordre de 0,060 à 0,065 ppm. Le seuil d'irritation varie selon les déterminations de 0,01 à 0,9 ppm. Les concentrations de l'ordre de 2 à 3 ppm sont nettement déplaisantes et pour un niveau de 4 à 5 ppm, la tolérance peut être admise pendant 10 à 30 minutes par certaines personnes mais pas par tous.

En ce qui concerne l'acroléine, elle est plus irritante encore. Son odeur est détectable dès concentrations de 0,20 ppm; à 1 ppm l'irritation est manifeste, et à 1,7 ppm elle est pratiquement intolérable.

Sur les animaux de laboratoires, les aldéhydes provoquent à des concentrations rencontrées dans l'atmosphère un accroissement de la résistance pulmonaire et une diminution de la vitesse de respiration. A des concentrations de 20 à 80 ppm on peut aboutir à des oedèmes et des hémorragies dans les poumons et des fluides dans les cavités pleurales et péritonéales.

L'étude des effets de l'ozone sur les animaux est utile

pour établir des indices de la qualité de l'air bien que les effets de ce type n'aient pas été signalés chez l'homme.

Chez les animaux de plusieurs espèces on a constaté qu'une exposition préalable à des concentrations d'ozone couramment rencontrées dans l'atmosphère (160 ug/m3, soit 0,08 ppm ou plus) rendait ces animaux sensibles à des aérosols infectants. Ces effets ne sont pas signalés chez l'homme. On a qignalé également que les animaux sont capables d'acquérir une tolérance à l'ozone (Stokinger & Scheel, 1962) mais on ne sait s'il en va de même pour l'homme. A cet égard, il convient de faire une distinction entre les effets aigus et les effets chroniques. Des observations récentes donnent à penser que la tolérance à l'ozone, chez les animaux de laboratoire, a pour effet principal d'éviter la mort par oedème aigu du poumon, alors qu'elle ne modifie en rien les atteintes subtiles des défenses pulmonaires ou l'apparition de lésions chroniques provoquées par une exposition prolongée à des concentrations faibles (Coffin & Gardner, 1971). Or c'est ce dernier type d'altérations qui est vraisemblablement provoqué par l'exposition aux concentrations courantes d'oxydants, et il serait imprudent de compter sur un mécanisme de tolérance pour la protection de l'homme.

5) Les Hydrocarbures aliphatiques

L'importance des Hydrocarbures aliphatiques (saturés ou non) produits par les véhicules automobiles semble résider dans la contribution qu'ils apportent à la formation du brouillard oxydant. En effet, aux concentrations où on les rencontre dans l'atmosphère des villes les hydrocarbures aliphatiques et alicycliques sont par essence biologiquement inertes. Ce sont donc les descendants des hydrocarbures tels que les aldéhydes, les PAN qui présentent une importance biologique et qui sont susceptibles de provoquer des effets néfastes sur les êtres humains bien plus que les hydrocarbures eux-mêmes. Ces corps peuvent néanmoins jouer un rôle dans la constitution de l'odeur des gaz d'échappement.

6) Odeurs désagréables

Les véhicules automobiles peuvent émettre des odeurs désagréables sous certaines conditions météorologiques. Les substances responsables de ces odeurs n'ont pas été déterminées exactement mais il s'agit essentiellement de produits résultant d'une combustion incomplète et de divers composants de carburants. en fait ce désagrément ne représente au point de vue de la santé publique qu'une simple gêne, mais la plupart des gens y voit une menace pour leur santé et peut développer en conséquence des réactions morbides du type psychosomatique. Ainsi convient-il de lutter contre cette forme de pollution bien qu'elle ne soit liée à aucun effet toxique.

7) Autres polluants

Des composés du nickel, du bore, du baryum, du manganèse et d'autres métaux sont de plus en plus ajoutés aux carburants et aux lubrifiants mais ils ne contribuent pas pour autant à la pollution de l'air.

Bien que les concentrations du dioxyde de soufre (SO_2) produits par les véhicules à moteur soient généralement faibles, ce dioxyde peut être oxydé au cours des réactions photochimiques en trioxyde qui est hydraté ensuite en acide sulfurique, responsable d'effets corrosifs.

B. Effets sur la végétation

A l'exception de l'éthylène les produits des gaz d'échappement ont peu d'effet sur les plantes aux concentrations habituelles observées dans l'atmosphère. En revanche, dans des conditions normales du milieu, la réaction photochimique produit de nouveaux corps qui peuvent endommager la végétation. Les substances particulaires n'agissent que relativement peu par le fait qu'elles recouvrent les feuilles et réduisent la photosynthèse. Les additifs pour essence interviennent sous forme soluble car ils sont absorbés soit par les racines soit par les feuilles.

1) Action de l'ozone et des oxydants

L'ozone parait être de tous les oxydants du brouillard photochimique celui qui est doué de pouvoir toxique le plus élevé pour les végétaux.

Les effets aigus sont manifestés par la mort de la cellule avec apparition de zones plus ou moins étendues de nécrose, réalisant des taches ou des mouchetures caractéristiques sur la feuille.

Les effets chroniques entrainent l'apparition d'une sénescence précoce avec ou sans chlorose.

Les effets physiologiques correspondent à des altérations de la croissance ou une reduction du rendement de production de la plante ou encore à des modifications dans la qualité de celle ci.

Expérimentalement certains dommages sont apparus chez des espèces sensibles à des expositions à 60 ug/m3 d'ozone (0,03 ppm) pendant 8 heures ou à 0,10 ppm pendant 1 heure. Le délai d'apparition des lésions sera plus court s'il existe simultanément un faible niveau de pollution par le dioxyde de soufre. Les végétaux les plus sensibles sont: le tabac, le haricot, le radis, la tomate, le brocoli, l'avoine, le blé, la pomme de terre, l'oignon, le bégonia, le lilas, la betterave, le chrysanthème, les agrumes et le coton.

En ce qui concerne les PAN des dommages apparaissent après des expositions à 50 ug/m3 (0,01 ppm) pendant 5 heures, les plantes sensibles sont endommagées après une exposition d'une heure aux mêmes concentrations ou pendant 8 heures à 0,01 ppm. Les PAN produisent sur la face inférieure des jeunes feuilles l'effet caractéristique de "glaçage" ou de "bronzage". A des concentrations faibles ils entrainent une sénescence précoce et une chlorose comme l'ozone.

Les plantes sensibles sont: les agrumes, le pétunia, le haricot, le tabac, la laitue, la betterave à sucre, la chicorée, l'épinard, le paturin annuel, la tomate et la bette poirée.

2) Les Oxydes d'azote (NO_x)

Les lesions aigues sont causées par des concentrations bien au dessus de celles trouvees d'ordinaire dans l'atmosphère. Il existe des plantes qui résistent apparemment bien à des concentrations dépassant 2 ppm pendant une durée d'exposition illimitée alors qu'on observe un arrêt net de croissance d'une variété sensible de tabac après une exposition brève à 0,5 ppm.

Des phénomènes de synergie ont été observés sur des plantes qui avaient été exposées à un mélange contenant 0,10 ppm de SO_2 et de NO_2.

3) Les Hydrocarbures

Certains végétaux sont sensibles à des doses infinitésimales d'éthylène: une concentration de 0,01 ppm peut causer des lésions importantes caractérisées par l'augmentation des vacuoles et réaliser une "fièvre végétale". Des troubles respiratoires apparaissent, toutes les feuilles finissent par tomber, entrainant parfois la mort de la plante.

A des concentrations de 0,1 ppm pendant 8 heures on observe des symptômes de sénescence précoce, des lésions chroniques, une chute des fleurs et des fruits, un arrêt de croissance de la plupart des plantes. L'orchidée, la rose, l'oeillet sont particulièrement sensibles à l'éthylène.

4) Le Monoxyde de Carbone (CO)

Le même phénomène est observé avec le CO mais à des concentrations beaucoup plus élevées. Aucun effet phytotoxique n'est observé à des concentrations normalement rencontrées dans l'atmosphère.

Il semble que l'éthylène et le monoxyde de carbone agissent sur les plantes par l'intermédiaire des hormones de croissance.

5) Les additifs pour essence

Ces polluants provoquent une sénescence précoce liée à l'accumulation sur les feuilles des doses anormalement élevées de nickel, de bore et de manganèse.

Le Plomb peut s'accumuler dans les tissus végétaux sans causer de dommages à la plantes mais peut devenir toxique pour les êtres humains et les animaux qui tirent de celle-ci leur nourriture.

C. Effets sur la faune

Il n'est pas certain que des conclusions tirées des études expérimentales sur les animaux de laboratoire puissent s'appliquer aux animaux sauvages ou domestiques.

Peu de renseignements portent directement sur l'influence des gaz d'échappement des vehicules à moteur sur les animaux sauvages ou domestiques dans leur habitat ordinaire.

D. Effets sur les matériaux

Les gaz d'échappement non dilués peuvent provoquer une

corrosion profonde des matériaux directement exposés.

1) Métaux

Des recherches ont démontré que c'est l'ion nitrate dans les particules de nitrate d'ammonium provenant des émissions des véhicules à moteur qui provoque des fissures dans les matériaux faits d'un alliage de nickel et de laiton.

Des oxydants comme l'ozone et les oxydes d'azote peuvent abîmer le métal.

2) Textiles

On pense que les tissus en nylon peuvent être détériorés par des polluants atmosphériques formant des vapeurs et des poussières acides. Ces polluants proviennent des gaz d'échappement des moteurs et l'acidité des poussières résulte des oxydes d'azote ou de l'acide sulfurique formé par oxydation du dioxyde de soufre.

Dans un milieu très humide l'ozone contribue à la décoloration des tapis en nylon, des textiles en coton et polyester. Les aldéhydes et les composés phénoliques (sous forme de gouttelettes de goudron) peuvent attaquer le nylon.

Expérimentalement on a montré que les émissions des véhicules à moteur peuvent accélérer la détérioration du nylon et que les textiles en coton perdent 20 % de leur résistance s'ils sont exposés humides à des concentrations de 0,06 ppm d'ozone pendant 50 jours. Par contre ils montrent peu de changement après une exposition à sec.

Des observations ont permis de constater que les produits de la réaction photochimique sont une des principales causes de la décoloration. Il existe une action synergique entre le dioxyde de soufre et des gaz d'échappement irradiés.

3) Caoutchouc

Des craquelures, des fendillements sont observés sur des produits en caoutchouc surtout lorsqu'ils sont pliés, courbés ou soumis à toute autre tension. Le caoutchouc naturel et certains élastomères synthétiques sont particulièrement sensibles: des craquelures sont décelées après une exposition de 45 minutes à des concentrations de 0,3 ppm d'ozone.

Même à des concentrations infimes l'ozone atmosphérique peut causer des dommages considérables: il fait subir de lourdes pertes à l'économie par son action propre et par les dépenses supplémentaires qu'il entraine sans parler du temps perdu en raison du mauvais fonctionnement de l'équipement etc..

E. Effets sur les biens

On déplore deux effets également importants par leurs conséquences economiques:

- d'une part, la pollution atmosphérique, par les composés acides qui la caracterisent, provoque des attaques au niveau des matériaux de construction, en particulier les métaux ferreux, et le zinc des toitures;

- d'autre part, les particules de suie, en se déposant sur les façades des immeubles causent des salissures qui sont responsables du triste aspect de beaucoup de cités.

F. Effets sur la visibilité

L'effet le plus évident de la pollution de l'air est de réduire la visibilité.

Le dioxyde d'azote dont la concentration atteint son maximum aux heures de pointe, absorbe la lumière dans la région bleue du spectre solaire et provoque la formation du voile brun qui recouvre les villes le matin.

Des études ont montré que la visibilité diminue à mesure que les concentrations des oxydants photochimiques augmentent et peut tomber parfois à moins de 500 m. A Los Angelès la visibilité est souvent tombée au dessous du seuil de sécurité pour le pilotage des avions.

L'humidité réduit encore davantage la visibilité. L'aérosol typique du complexe photochimique se compose surtout d'acide sulfurique ou de sulfates et des hydrocarbures polymérisés. La présence de l'ion sulfate est facilement expliquée par l'oxydation du dioxyde de soufre lors de la réaction photochimique. Il suffit de très petites quantités de SO_2 pour réduire la visibilité dans de fortes proportions.

De tous les effets de la pollution de l'air par les gaz d'échappement des véhicules à moteur la réduction de la visibilité est peut-être le plus manifeste et celui qui cause le plus de gêne. Elle peut entrainer de grandes pertes de temps, de sérieux risques d'accidents aussi bien sur le trafic aérien que routier et ferroviaire.

G. Effets sur le climat

On craint que l'accumulation du dioxyde de carbone n'entraine un échauffement progressif de la terre par effet de serre c'est à dire en ralentissant le transfert de la chaleur à la surface de la terre vers l'espace.

A l'inverse, l'accroissement de quantités de fines substances particulaires peut être à l'origine de l'abaissement de la température sur tout le globe en faisant écran au rayonnement solaire à ondes courtes.

D'autre part en dehors des effets de la pollution de l'atmosphère sur le climat urbain, et l'expansion des noyaux de condensation au dessus des villes peut augmenter la fréquence du brouillard et des précipitations.

H. Interactions dans le milieu

Du fait que le milieu forme un sytème dynamique dont les éléments agissent les uns sur les autres il est nécessaire de considérer la pollution de l'air dans son ensemble en tenant compte des échanges entre l'air, l'eau et la terre. C'est ainsi que les gaz et les particules émis qui polluent l'air vont refluer pour une grande part vers la terre ou vers les eaux de surface et de là reviennent dans l'organisme humain par l'intermédiaire des aliments et de la boisson.

MOYENS DE PREVENTION

Les moyens de prevention contre la pollution par les gaz d'échappement des véhicules automobiles peuvent être classés en 4 catégories:

1) procédés techniques et dispositifs mécaniques,

2) mesures législatives visant à assurer les solutions les moins onéreuses pour réduire la pollution;

3) surveillance du milieu et de la santé publique pour mesurer l'efficacité des règlements;

4) planification urbaine permettant la plus large dispersion possible des gaz résiduels émis par les automobiles munis d'un dispositif antipollution.

Le troisième point a été traité plus haut, il ne nous reste plus à voir que les trois autres.

A.- Les moyens techniques

Le problème de l'abaissement des gaz d'échappement des véhicules automobiles est en fait assez compliqué à l'heure actuelle. Par exemple si l'on essaie de réduire, par un réglage pauvre, les émissions d'hydrocarbures et de monoxyde de carbone on entraine une élévation des émissions d'oxydes d'azote.

Pour faire face aux divers problèmes posés, deux grandes solutions ont été proposées:

- soit améliorer la qualité des émissions sans entrainer des bouleversements technologiques au stade de la construction,

- soit adopter les innovations technologiques qui entraineront des dépenses et une augmentation du prix de revient des moteurs.

1) Améliorations sans innovations technologiques

a) Par une méthode de réglage du carburateur on a pu abaisser au ralenti le taux des émissions de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures en dessous de 4,5 % imposé.

b) On a proposé un recyclage des gaz du carter en les dirigeant à nouveau, par des soupapes spécialement conçues vers l'alimentation, soit avant soit après le carburateur, ce qui permet une réduction d'environ 95 % des sorties de gaz du carter.

c) On peut envisager de supprimer presque totalement les évaporations d'hydrocarbures:

- en isolant thermiquement le carburateur ou

- en installant sur les réservoirs des dispositifs pièges.

d) On peut abaisser les teneurs en monoxyde de carbone et d'hydrocarbures par système modifié d'admission-allumage avec mélange moins riche et réglage différent de l'avance. On peut en particulier couper l'alimentation en essence pendant la

phase de décélération, par des procédés adéquats.

e) On a proposé d'injecter de l'air frais dans les soupapes d'échappement qui apporte de l'oxygène aux imbrûlés et leur permet de brûler à nouveau. Ce procédé provoque une augmentation considérable de la chaleur dans les chapelles d'échappement.

f) Enfin, une bonne instruction du conducteur, un bon entretien du moteur, un réglage correct du moteur au ralenti, des bougies et des systèmes d'allumage en bon état sont des procédés simples et peu coûteux mais qui contribuent d'une façon non moins importante à l'abaissement des gaz d'échappement des véhicules automobiles.

2) Améliorations avec innovations techniques

a) On a envisagé la possibilité de réduire les émissions des substances particulaires, en particulier du Plomb par des pots d'échappement spéciaux munis de filtres ou de cyclônes. Ces dispositifs permettraient de diminuer les émissions de Plomb dans la même proportion que l'abaissement du Plomb tétraéthyl dans l'essence.

b) La réduction des émissions des oxydes d'azote se heurte à plusieurs obstacles:

- le recyclage des gaz d'échappement a pour but de diluer le mélange combustible admis dans les cylindres, ce qui fait abaisser les températures de pointe et la proportion de monoxyde d'azote formé. Mais ce procédé est considéré plutôt comme une régression technologique car il diminue le rendement du cycle de Carnot.

- l'utilisation des systèmes catalyseurs dans l'oxydation des oxydes d'azote est gênée par la présence des composés de Plomb. En effet, ces derniers sont ajoutés à l'essence pour leur pouvoir antidétonnant mais ils agissent en même temps comme un poison des catalyseurs.

c) En ce qui concerne les hydrocarbures et le monoxyde de carbone, des dispositifs supplémentaires ont été mis au point.

Le but est de ramener à 50 ppm et 0,5 % respectivement les teneurs des hydrocarbures et du monoxyde de carbone dans les gaz d'échappement. Le dispositif est un reacteur à haute température conçu pour remplacer le collecteur d'échappement.

Cette technique de post-combustion utilise un mélange riche, ce qui permet en même temps de réduire les émissions des oxydes d'azote. On se heurte à un obstacle: le coût excessif des métaux capables de résister à des températures élevées.

Un autre dispositif utilise un système de carburation à haut rendement qui permet d'admettre un mélange pauvre air-carburant (d'où émission réduite d'oxydes d'azote et faibles concentrations d'hydrocarbures et de monoxyde de carbone).

3) Autres solutions

a) Modification du carburant pour empêcher les évaporations

- soit en diminuant la teneur en hydrocarbures légers,

- soit en éliminant du carburant les carbures éthylèniques à C_4 et C_5.

Toutefois pour pouvoir modifier ainsi la composition du carburant il faudrait transformer les raffineries.

b) Utilisation du gaz naturel (méthane) ou des gaz liquéfiés (propane)

Avec un réglage particulier du moteur on peut abaisser les oxydes d'azote en même temps que les hydrocarbures et le monoxyde de carbone.

c) Moteur à charge stratifiée

On réalise avec ce type de moteur un mélange hétérogène qui serait très pauvre dans l'ensemble mais dans lequel les fractions riches seraient localisées au voisinage de la bougie. La combustion s'amorcerait dans cette zone et se propagerait ensuite dans la zone pauvre. Ce procédé n'en est qu'au stade expérimental.

d) Véhicules à moteur électrique

Silencieux et propres, ces véhicules conviennent parfaitement à la vie urbaine. Cependant les performances actuelles des generateurs ne permettent d'obtenir ni une vitesse ni une autonomie suffisantes.

e) Moteur à combustion externe

- Le moteur à vapeur type Rankine

Les concentrations des hydrocarbures et du monoxyde de carbone sont réduites à moins de 4 % des quantités provenant des moteurs à essence.

La difficulté est d'accroître le rendement de combustion et de condensation pour diminuer le délai de mise en marche.

- Le moteur Stirling

C'est un ancien moteur à air chaud dans lequel l'air est remplacé par de l'hélium.

Les problèmes sont nombreux à résoudre: le refroidissement du moteur, le délai de mise en marche, l'étanchéité du circuit.

B.- Les mesures législatives

1) USA

C'est le pays qui a promulgué le premier des lois sur les véhicules automobiles. Et c'est la règlementation en vigueur aux Etats-Unis qui a la plus grande influence dans le monde entier, car c'est sur l'expérience des Etats-Unis que se basent les études de la prévention tant au point de vue technique que législatif dans de nombreux pays.

La loi la plus importante est celle du 10 VI 1966 de l'Etat de Californie sur les véhicules automobiles.

Elle a pour objet de fixer des limites aux émissions de gaz d'échappement pour les véhicules construits à partir de 1966:

Hydrocarbures	275 ppm
Monoxyde de carbone	1,5 %

et de rendre obligatoire avant 1968 l'installation de dispositifs supprimant les sorties de gaz du carter.

Le gouvernement fédéral a, de son côté fixé des normes pour la composition des gaz d'échappement applicables à toute voiture construite ou importée aux Etats-Unis. Ces normes promulguées en juin 1968 sont les suivantes:

1° Limites maximales admissibles pour les produits d'échappement des véhicules neufs de moins de 3 tonnes (poids brut) à partir du modèle 1970:

Hydrocarbures	2,2 g	par mile (= 1,3 g/km)
Monoxyde de carbone	23 g	par mile (= 14 g/km)

2° Pour les véhicules légers du modèle 1971, les évaporations de carburant, mesurées par une épreuve normalisée, ne doivent pas dépasser 6 g.

3° Limites maximales admissibles pour les produits d'échappement des véhicules lourds à essence, à partir du 1er janvier 1970:

Hydrocarbures	275 ppm
Monoxyde de carbone	1,5 %

pour les véhicules à moteur diésel:

Opacité maximale des fumées émises par les véhicules neufs:

20 % en régime de croisière
40 % pendant les accélérations

4° Une nouvelle règlementation du 10 novembre 1970 applicable aux modèles 1972 - 73 - 74 de cylindrée supérieure à 50 inch3 apporte deux modifications importantes par rapport au modèle 1970:

- la première concerne le cycle urbain à utiliser
- la seconde la mesure des polluants.

La technique imposée donne sur un même véhicule des valeurs plus élevées que la procédure courante en usage précédemment. Les valeurs limites ont été ainsi relevées. Les émissions tolérées passent pour les hydrocarbures de 2,2 à 3,4 g par mile et pour le monoxyde de carbone de 23,0 à 39,0 g par mile.

Les valeurs limites des oxydes d'azote jusque là non réglementées, sont de 3 g par mile applicables aux modèles 1973.

La Règlementation des modèles 1975 dont le but est d'abaisser les émissions de 90 % par rapport aux modèles de l'année 1970, fixe des normes suivantes:

Hydrocarbures	0,41	g/mile
Monoxyde de carbone	3,4	g/mile
Oxydes d'azote	3,0	g/mile
Evaporations d'hydrocarbures	2,0	g/mile

Les émissions tolérées des oxydes d'azote sont abaissées à 0,4 g/mile pour les modèles 1976.

2) Europe

a) Allemagne fédérale:

Un projet de loi prévoit des valeurs limites à 4,5% de monoxyde de carbone dans les gaz d'échappement des véhicules au ralenti.

b) Angleterre:

La règlementation vise surtout à lutter contre les émissions de fumées ou vapeurs visibles, elle prévoit un système d'approbation des normes notamment pour le rapport poids-puissance et les caractéristiques de fonctionnement des moteurs.

c) Belgique:

L'opacité des fumées émises par les moteurs diésel ne doit pas dépasser 50 unités Hartridge.

d) Italie:

Une règlementation analogue à celle de la Belgique et un projet de loi anti-smog sont a l'étude.

3) Asie

Japon:

Arrêté du Ministère des Transports fixant à 3 % la concentration maximale du monoxyde de carbone dans les produits d'échappement des modèles construites après septembre 1966.

4) France

- Arrêté du 12 XI 1963 concernant les fumées émises par les véhicules automobiles.

- Arrêté du 28 VII 1964 sur le recyclage des gaz de carter.

- Décret du 5 II 1969 modifiant et complétant le Code de la Route (Art R 69 et R 71).

- Arrêté du 30 VI 1970 relatif aux émissions de gaz polluants par les moteurs à essence des véhicules. Ce texte réglemente les émissions des fumées en rendant obligatoire l'utilisation de l'opacimètre de Hartridge.

Il fixe les normes des émissions de polluants comme suit:

+ l'opacité des fumées émises pendant la marche et au ralenti ne doit pas dépasser 40 - 60 Hartridge;

+ la quantité des hydrocarbures contenue dans les gaz de carter ne doit pas dépasser 0,15 % du poids du combustible consommé;

+ la teneur en monoxyde de carbone des gaz d'échappement lorsque le moteur tourne au ralenti à vide est fixée à 4,5 % pour les véhicules dont le poids total en charge n'excède pas 3,5 tonnes;

+ la composition des gaz d'échappement pendant que le moteur tourne à différents régimes est également fixée. Les valeurs limites sont rassemblées dans un tableau figurant dans le texte. En fait ces valeurs répondent aux deux formules sui-

vantes:

pour les hydrocarbures: HC (en g) = 6 + 0,003 I
pour le monoxyde de carbone: CO (en g) = 48,48 + 0,07576 II

C.- Le rôle de l'urbanisme

L'urbanisme peut jouer un rôle important surtout à longue échéance, en réduisant au maximim les effets que peuvent avoir sur le milieu les émissions des véhicules automobiles.

La planification urbaine doit tenir compte des facteurs météorologiques de dispersion; prévoir des réseaux de transports qui desserviront les complexes résidentiels, commerciaux, industriels; prévoir l'extension et la multiplication des espaces libres.

Dans les villes anciennes où le travail de prevention est beaucoup plus difficile, les mesures prises sont plutôt curatives que préventives, il faut supprimer les insalubrités existantes; démolition de vieux quartiers pour édifier des espaces verts, interdiction de construire de nouveaux immeubles.

D.- La politique des transports

Dans les villes elle vise surtout à réduire la pollution provenant des moteurs tournant au ralenti.

On a suggéré de procéder à de vastes expropriations pour élargir les rues et faciliter la circulation.

On a pu créer des voies spéciales directes où il n'y a pas de croisements pour rendre la circulation plus fluide; des autoroutes circulaires de dégagement autour des villes.

On a préconisé d'interdire dans certaines rues la circulation de poids lourds, de prévoir des contraventions pour les poids lourds lorsque la carburation est mal réglée et lorsque s'échappent des nuages noirâtres.

On a incité fortement les automobilistes à avoir recours aux transports communs, des voies de circulation réservées aux autobus et aux taxis leur permettent de faire des parcours plus rapides. Les parkings de dissuasion situés au terminus des lignes de métro permettent aux habitants de la banlieue de ne pas encombrer les rues de la capitale.

Il a été proposé aussi de:

- interdire à certaines heures la circulation dans quelques rues de la capitale;

- interdire le stationnement gratuit;

- établir une limitation de stationnement dans le centre de la ville pour les voitures à essence et à gas-oil.

NORMES DE QUALITE D'AIR AMBIANT EN CE QUI CONCERNE LES PRINCIPAUX POLLUANTS EMIS PAR LES VEHICULES

Peu de pays ont jusqu'à présent mis en vigueur des normes de qualité d'air ambiant.

A.- Monoxyde de Carbone (CO)

a) Aux Etats-Unis on distingue les normes fédérales et celles des Etats.

1) La norme fédérale est à 2 étages et a prévu les concentrations maximales suivantes, dépassables une fois seulement dans l'année:

10 mg/m3 concentration maxima moyenne sur 8 heures

15 mg/m3 " " " " 1 heure

2) L'Etat de Californie a prévu également une norme à deux étages:

10 ppm (11,2 mg/m3) concentration moyenne sur 12 heures

40 ppm (45 mg/m3) concentration moyenne sur 1 heure

Il est précisé qu'à ces niveaux et pendant les temps indiqués, le taux de carboxyhémoglobine peut atteindre 2 à 2,5 % et que ce niveau est celui au dessus duquel on observe des détériorations de la faculté de discriminer des intervalles de temps, des altérations de la fonction visuelle et des performances psychomotrices.

b) Au Canada, l'Etat d'Ontario a adopté les normes suivantes:

8 ppm concentration moyenne pendant 24 heures

15 ppm " " " 8 "

40 ppm " " " 1 "

B.- Hydrocarbures

Seules les autorités fédérales des Etats-Unis ont promulgué une norme de qualité d'air ambiant pour les hydrocarbures.

Il est décidé que la concentration de 125 ug/m3, après correction du méthane présent, en tant que concentration maximale pendant les 3 heures s'étendant de 6 heures à 9 heures du matin, ne pourrait être dépassée qu'une fois dans l'année.

C.- Oxydes d'azote (NO_x)

Le gouvernement fédéral des Etats-Unis a édicté une norme à 2 étages:

100 ug/m3 moyenne arithmétique annuelle

250 ug/m3 concentration maximale moyenne sur 24 heures

L'Etat de Californie a limité à 0,5 ppm comme concentration moyenne sur une heure, en précisant qu'à ce niveau on peut

observer une décoloration des produits manufacturés. A des teneurs légèrement supérieures des effets ont été observés chez les animaux de laboratoire.

Le Canada adopte la norme suivante pour les oxydes d'azote exprimés en NO_2:

0,20 ppm concentration moyenne pendant 1 heure

0,10 ppm " " " 24 heures

D.- Oxydants: O_3 et PAN

- Le gouvernement fédéral des Etats-Unis a défini une norme pour les oxydants photochimiques totaux, dépassable une seule fois dans l'année:

125 ug/m3 concentration moyenne sur 1 heure

- L'Etat de Californie spécifie que la limite de 0,10 ppm par la méthode à l'iodure de potassium neutre tamponné, comme moyenne pendant une heure, ne doit pas être dépassée, et précise qu'à des concentrations légèrement supérieures, on observe une irritation de l'oeil. Il précise également que le niveau retenu est inférieur à celui qui est associé avec une aggravation des maladies respiratoires.

- Le Canada aurait adopté la norme suivante, à 2 étages:

0,10 ppm concentration moyenne pendant 1 heure

0,03 ppm " " " 24 heures

E.- Plomb

Comme on ignore les effets exacts de ce polluant, plusieurs pays ont pris des normes sans qu'elles soient parfaitement assises sur des considérations physiopathologiques certaines. C'est ainsi, par exemple qu'au Japon une norme à 2 étages a été recommandée:

5 ug/m3 concentration moyenne sur 24 heures

15 ug/m3 " " " 8 "

Californie: 1,5 ug/m3 concentration moyenne mensuelle

Pennsylvanie: 5 ug/m3 " " "

URSS: 0,7 ug/m3 " " "

CONCLUSION

C'est par centaines de millions de tonnes que les véhicules automobiles déversent des polluants dans l'atmosphère chaque jour sous forme de gaz d'échappement.

La relation de cause à effet entre les gaz d'échappement des voitures à moteur et la formation du brouillard photooxydant qui occasionne des irritations des muqueuses au niveau des gens et des dommages aux végétaux est bien demontrée scientifiquement. A côté de la production de ce brouillard photochimique qui n'est connu que sous certains climats, la circulation automobile est partout dans le monde la source d'émission, d'une part de fumées noires qui sont à l'origine du salissement des immeubles et d'autre part d'odeurs désagréables qui causent bien des maladies psychosomatiques. En outre à l'heure actuelle, on a trouvé dans les gaz d'échappement des substances chimiques du type benzo 3,4 pyrène dont le pouvoir cancérigène est certain et vérifié histologiquement.

De plus, ces produits qui ne se trouvent qu'à des concentrations infimes dans l'atmosphère peuvent agir par synergie avec des polluants d'autres sources et causer des effets plus nocifs que s'ils sont pris isolément.

Enfin, dans l'état actuel de nos connaissances scientifiques rien ne nous permet de dire si ces produits ne sont pas à l'origine des actions cliniques à long terme.

Si nous tenons compte de tous ces faits, il nous apparait impératif que la circulation automobile soit prise en considération dans le programme d'assainissement de l'atmosphère des villes par l'application rigoureuse de tous les moyens de prevention afin d'obtenir une qualité satisfaisante de l'air.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

1.- CHOVIN P. et ROUSSEL A., Physicochimie et physiopathologie des polluants atmosphériques. Paris, Masson 1973.

2.- CHOVIN P. et ROUSSEL A., La Pollution atmosphérique, Coll. "Que sais-je?". Paris, Presses Universitaires de France, 1974.

3.- MALLET L., Pollution des milieux vitaux par les hydrocarbures polybenzeniques du type benzo 3,4 pyrène. Paris, Maloine 1972.

4.- Org. mond. Santé Série Rapp. techn., 1969, N° 410

5.- Org. mond. Santé Série Rapp. techn., 1972, N° 506